

Die Grundlage akustischer Messungen

Das Resultat akustischer Messungen wird in der Regel in dB angegeben. Als Bezugsgrösse wird dabei ein Schalldruck von $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ verwendet, welcher der Hörschwelle des Menschen entspricht. Für die Realisierung der Einheit werden in der Akustik Laborstandard-Mikrophone als Referenznormale eingesetzt. Alle Schallpegelmessungen werden letztlich durch Kalibrierungen bzw. Eichungen auf diese Referenzen rückgeführt. Diese werden ihrerseits durch das hier beschriebene Druckkammer-Reziprozitätsverfahren primär kalibriert.

CHRISTIAN HOF

Das Gehör ist zweifellos das wichtigste Wahrnehmungsorgan des Menschen. Über den Gehörsinn läuft der grösste Teil der zwischenmenschlichen Kommunikation. Ausserdem vermittelt er uns (bewusst oder unbewusst) eine Vielzahl von Umwelteindrücken, die uns vor Gefahren, wie einem herannahenden Auto schützen, uns eine Orientierung in den individuellen Geräuschlandschaften unserer Lebensräume ermöglichen oder ein Gefühl von Geborgenheit vermitteln. Über ihren Klang beurteilen wir Eigenschaften von Materialien (Härte, Masse, Festigkeit), die Qualität von Produkten oder gar die Frische von Früchten, Gemüse und anderen Lebensmitteln. Mit Musik können nicht nur Emotionen stimuliert werden, sie kann auch Erinnerungen wachrufen, Schmerzen lindern, psychische Barrieren überwinden helfen.

Durch den Menschen wahrnehmbaren Schall messen

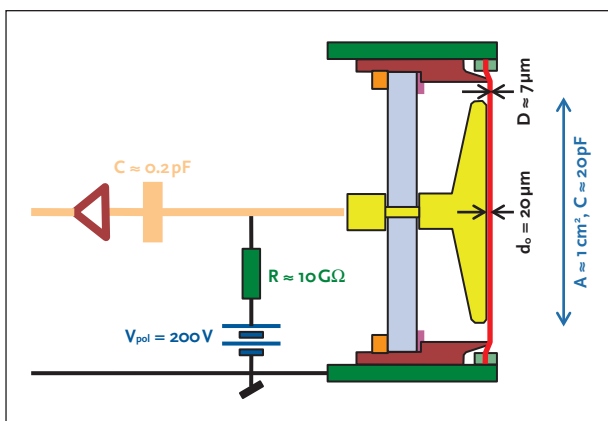
Entsprechend vielseitig sind die Motivationen, Schall zu messen. Sei es zur objektiven Bestimmung des Hörvermögens von Patienten, sei es zur Beurteilung einer Wohnsituation im Zusammenhang mit der Lärmbekämpfung. Die akustischen Eigenschaften von Hörgeräten, Lautsprechern, Mikrofonen, Schallquellen aller Art werden über Messungen charakterisiert. Die Sprachverständlichkeit in einem Schulzimmer ist ebenso wichtig für dessen Eignung zum vorgesehenen Zweck wie die Raumakustik eines Konzertsaals. Bei einzelnen Produkten

(z.B. in der Automobilindustrie) wird die wahrgenommene Qualität massgeblich durch die akustischen Eigenschaften bestimmt, so dass beträchtlicher Aufwand in deren Optimierung investiert wird. Bei anderen Produkten (wie Wärmepumpen) quantifizieren akustische Messungen den Erfolg der Lärmreduzierungsmaßnahmen.

Akustische Messungen sollten den gesamten Hörbereich des Menschen abdecken können. Dieser beinhaltet Frequenzen von ca. 20 Hz bis 20 kHz. Die kleinsten periodischen Druckänderungen, die vom menschlichen Gehör als Schallempfindung wahrgenommen werden können, haben eine Amplitude von $20 \mu\text{Pa}$. Solche Druck-Änderungen sind unvorstellbar klein: Im Vergleich dazu beträgt z.B. bei einer Fahrt mit einer Gondelbahn die Änderung des hydrostatischen Luftdrucks ca. 1000 Pa (= 10 mbar) pro 100 m. Man erfährt also schon bei einer Höhenänderung von $2 \mu\text{m}$ eine Druckänderung, welche der menschlichen Hörschwelle (0 dB) entspricht (die man also hören könnte, wenn sie 1000 mal pro Sekunde auftreten würde). Schallsignale mit Druckamplituden, die ca. 10^6 mal grösser sind (120 dB), empfinden wir als Schmerz – sie schädigen unser Gehör nachhaltig.

Messmikrophone – faszinierende Wandler

Schallmessungen werden in der Praxis mit Kondensator-Mikrofonen vorgenommen. Diese bestehen im Wesentlichen aus einem elektrischen Kondensator, dessen eine Elektrode aus einer dünnen (wenige μm) metallischen Membran gebildet wird, die in kleinem Abstand (typischerweise $d_0 \approx 20 \mu\text{m}$) über eine elektrisch isoliert befestigte Gegenelektrode gespannt ist. Dieser Kondensator (von ca. 5–50 pF) wird mit einer konstanten elektrischen Ladung versehen. Eine solche kann z.B. über eine hochohmig ($> 10 \text{G}\Omega$) angekoppelte elektrische Gleichspannung ($V_{\text{pol}} = 200 \text{V}$) erzeugt werden. Wenn sich unter dem Einfluss des Schalldrucks die Mikrofonmembran bewegt, ändert sich der effektive Plattenabstand und damit die Kapazität. Man kann leicht zeigen, dass eine Verschiebung der Membran um Δd (aufgrund der konstanten Ladung) eine Ausgangsspannung von $\Delta V \approx V_{\text{pol}} \cdot \frac{\Delta d}{d_0}$ zur Folge hat. Diese Proportionalitäts-Beziehung gilt mit hoher Genauigkeit über viele Grössenordnungen. Typische Messmikrophone weisen bei einer Empfindlichkeit von 10–50 mV/Pa einen Dynamikumfang von $> 140 \text{dB}$, d.h. $> 10^7$ auf. Das scheint unglaublich,



1: Schematische Darstellung eines Kondensator-Mikrophons und der elektrischen Polarisationsspannung. Die elektrisch isoliert montierte Gegenelektrode (gelb) bildet mit der Metallmembran (rot) einen Kondensator.

wenn man sich die geometrischen Verhältnisse vergegenwärtigt: Da die grössten möglichen Membran-Bewegungen durch den Elektrodenabstand von $d_0 \approx 20 \mu\text{m}$ limitiert sind, entsprechen also die geringsten elektrisch noch gut messbaren Signale einer mittleren Verschiebung der Mikrofonmembran um 2 pm . Offensichtlich lassen sich also Bewegungen der Mikrofonmembran um Bruchteile eines Atom-Durchmessers zuverlässig in elektrische Signale umwandeln!

Das Funktionsprinzip der Kondensator-Mikrophone ist in vieler Hinsicht technologisch faszinierend und physikalisch interessant. So herrscht beispielsweise zwischen den Elektroden eine riesige elektrische Feldstärke von 10 kV mm^{-1} . Unter Standardbedingungen würden 3 kV mm^{-1} für eine Funkenentladung ausreichen. Ein Funkenüberschlag wird nur dadurch verhindert, dass sich die Stossionisation auf der relativ kurzen Wegstrecke zu keiner nennenswerten Kettenreaktion (Ionen-Multiplikation) auswachsen kann.

Mikrophone als «Lautsprecher»

Für die Metrologie ist es jedoch insbesondere die Eigenschaft der Kondensatormikrophone, «reziproke Wandler» zu sein, welche sie auch für die primäre Realisierung der Einheit des



2: Ein goldfarbenes Laborstandard-Mikrophon wird mit einem Saphirkuppler an ein zweites gekoppelt.

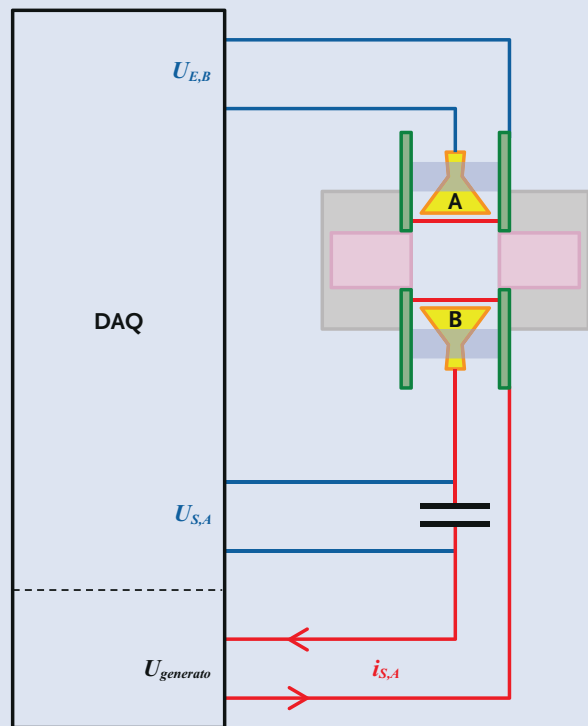
Schalldrucks interessant macht. Tatsächlich können Messmikrophone sowohl als Empfänger, als auch als Schallsender («Lautsprecher») funktionieren. Dabei ist die Empfindlichkeit in beiden Richtungen identisch. Ein an der Mikrofonmembran anliegender Schalldruck p wird mit einer Empfindlichkeit S_p in eine elektrische Spannung $U \text{ (V)} = S_p \cdot p \text{ (Pa)}$ umgewandelt. Umgekehrt erzeugt ein mit einem Wechselstrom i durchflossenes Mikrofon einen Schallfluss $q \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} = S_p \cdot i \text{ (A)}$ mit dem identischen Wandlungsfaktor S_p . Dieser Sachverhalt lässt sich basierend auf dem Funktionsprinzip des Mikrophones theoretisch nachweisen obwohl er zunächst schon alleine auf-

Druckkammer-Kalibrierung nach der Reziprozitätsmethode

Für eine Druckkammer-Kalibrierung nach der Reziprozitätsmethode werden 3 Laborstandard-Mikrophone benötigt, wovon jeweils zwei in sogenannten akustischen Kupplern paarweise betrieben werden: z.B. ein Mikrofon A als Schallsender und ein Mikrofon B als Empfänger. Für eine solche Kombination lässt sich die elektrische Transfer-Impedanz $Z_{e,AB} = \frac{U_{E,B}}{i_{S,A}}$ leicht messen (wobei $U_{E,B}$ die im Empfänger B erzeugte elektrische Spannung bei einem im Sendemikrofon A injizierten Strom $i_{S,A}$ entspricht). Tatsächlich führt eine ganze Kette von Wandlungsprozessen zu dieser elektrischen Transfer-Impedanz: Zunächst erzeugt das Sendemikrofon A einen Schallfluss $q_{S,A} = S_{p,A} \cdot i_{S,A}$. Im akustischen Kuppler wird dieser Schallfluss über dessen akustische Transfer-Impedanz $Z_{a,AB} = \frac{p_{E,B}}{q_{S,A}}$ in einen Schalldruck auf der Membran des Empfänger-Mikrophones übertragen. Dieses wandelt diesen Schalldruck dann in eine elektrische Spannung $U_{E,B} = S_{p,B} \cdot p_{E,B}$ um. Man findet also für unterschiedliche Paarungen:

- AB) $Z_{e,AB} = S_{p,A} \cdot Z_{a,AB} \cdot S_{p,B}$
- AC) $Z_{e,AC} = S_{p,A} \cdot Z_{a,AC} \cdot S_{p,C}$
- BC) $Z_{e,BC} = S_{p,B} \cdot Z_{a,BC} \cdot S_{p,C}$

In diesem Gleichungssystem lassen sich die elektrischen Transfer-Impedanzen ($Z_{e,AB}, \dots$) messen und die akustischen Transfer-Impedanzen ($Z_{a,AB}, \dots$) für hinreichend einfache Geometrien berechnen. Somit lassen sich auch die (drei) unbekanntenen Mikrofon-Empfindlichkeiten ermitteln.



Man findet z.B. für:

$$\sqrt{\frac{AB) \cdot AC)}{BC)} \rightarrow S_{p,A} = \sqrt{\frac{Z_{e,AB} \cdot Z_{e,AC}}{Z_{e,BC}} \cdot \frac{Z_{a,BC}}{Z_{a,AB} \cdot Z_{a,AC}}}$$

grund der unterschiedlichen Einheiten erstaunlich scheint: So sieht man erst bei genauerem Hinsehen, dass $\frac{V}{Pa}$ und $\frac{m^3 \cdot s^{-1}}{A}$ tatsächlich die gleichen Einheiten sind. Die Reziprozitätsmethode (IEC 61094-2) baut nun auf dieser Eigenschaft auf und ermöglicht die absolute Bestimmung der Empfindlichkeit von Labor-Standardmikrophonen (siehe Kasten).

Praktische Umsetzung

Für die Messung der elektrischen Transfer-Impedanzen kommt eine qualitativ hochwertige Messkarte (DAQ) zum Einsatz. Ein darin integrierter D/A-Wandler wird als Signal-Generator genutzt, wobei der im Sendemikrophon injizierte Strom als Spannungsabfall über einem in Serie geschalteten Referenz-Kondensator gemessen wird. Das Empfangsmikrophon wandelt den akustischen Schalldruck in eine elektrische Spannung um, die auf einem zweiten Messkanal gemessen wird. Das Übertragungsverhalten der verwendeten Vorverstärker wird während der Messwertaufnahme bei jeder Frequenz mit Hilfe der «insert-voltage method» kalibriert. Eine separate Multiplexer-Einheit ermöglicht die dafür benötigten Konfigurations-Umschaltungen, speist die Vorverstärker und stellt die Polarisationsspannung der Mikrophone zur Verfügung. Um neben dem Frequenzgang auch eine Phasenantwort ermitteln zu können, werden sämtliche Spannungen (mit Hilfe der «sine-approximation-method») als komplexe Größen (Amplitude und Phase) bestimmt.

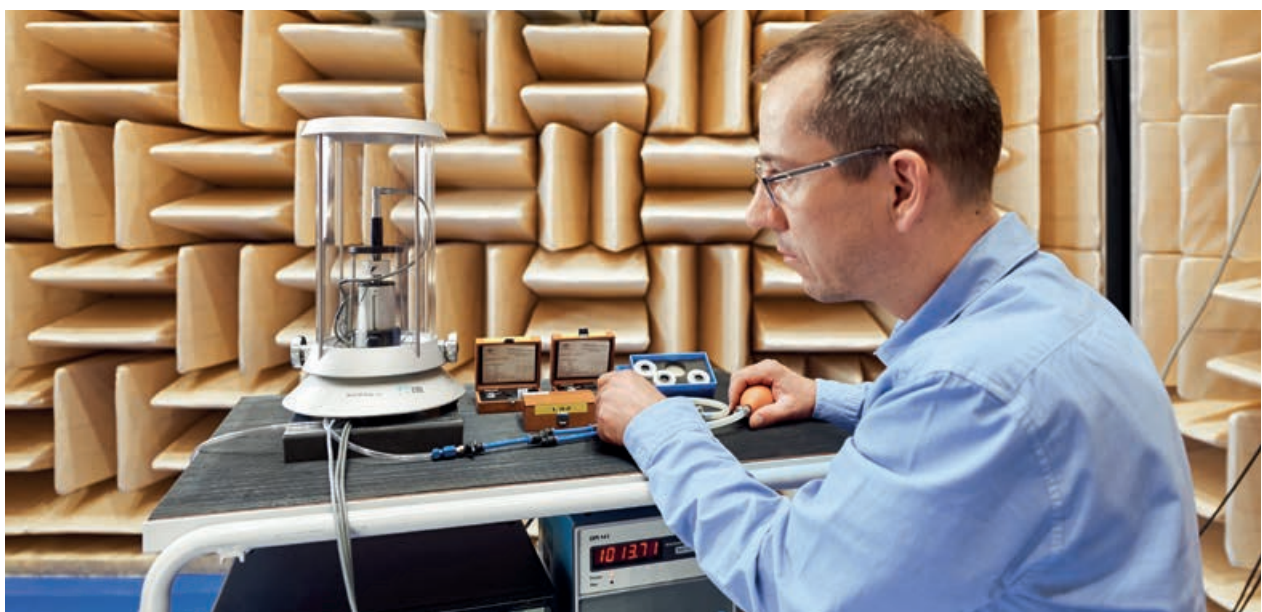
Da die Mikrophon-Empfindlichkeit sowohl von der Temperatur, als auch vom vorherrschenden Luftdruck abhängt, ist es wichtig, dass die Messungen unter Standard-Bedingungen durchgeführt werden (hydrostatischer Luftdruck: 1013.25 hPa, Temperatur: 23 °C). Aus diesem Grund werden diese Messungen am METAS in einem thermostatisierten Labor und unter einer Plexiglas-Glocke durchgeführt, unter welcher der in Wabern vorherrschende Luftdruck manuell mit einer Druckpumpe um ca. 60 hPa erhöht werden kann. Ohne diese Anpassung der

Messbedingungen würden wir (bei 250 Hz) einen systematischen Fehler von ca. 0.092 dB erzeugen (bei einer Messunsicherheit von 0.034 dB).

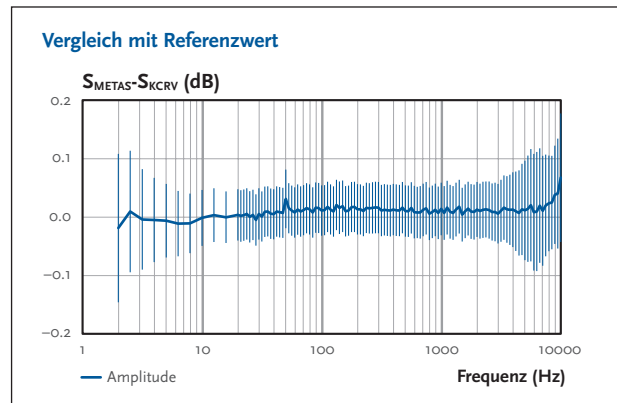
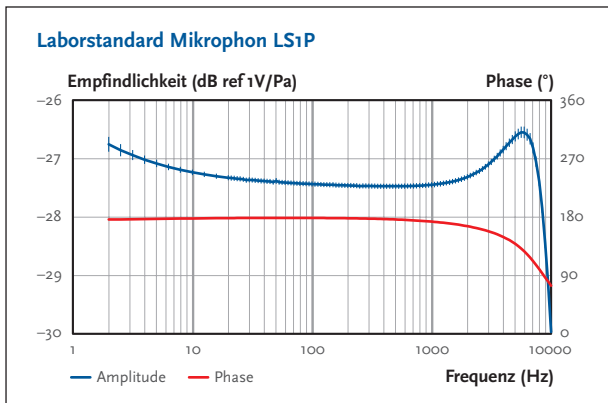
Herausforderungen

Die rechnerische Bestimmung der akustischen Transfer-Impedanz ist nicht trivial. Zunächst muss die Geometrie so einfach wie nur irgend möglich gestaltet werden. So wurden eigens zu diesem Zweck sogenannte Labor-Standard-Mikrophone spezifiziert (IEC 61094-1). Diese können mit Hilfe sogenannter «plane-wave»-Kuppler so zu einer Struktur erweitert werden, dass sich die resultierende Geometrie als Zylinder beschreiben lässt. Für die Kalibrierung müssen sowohl die Geometrie der Kuppler (Länge und Durchmesser) als auch der Front-Kavitäten (Distanz zwischen Auflage und Mikrophon-Membran und Durchmesser) der Mikrophone bekannt sein. Diese Größen werden im Labor «Länge, Nano- und Mikrotechnik» bestimmt.

Allerdings reicht eine exakte Kenntnis der Geometrie für eine hinreichend genaue Bestimmung der akustischen Transfer-Impedanz nicht aus. Tatsächlich weicht nämlich das für die akustische Kopplung effektiv aktive Volumen aus verschiedenen Gründen signifikant vom geometrischen Volumen ab. Zum einen wirkt die (frequenzabhängige) Nachgiebigkeit der Mikrophon-Membran wie ein zusätzliches, äquivalentes Volumen, um welches sich die Kupplungs-Kavität vergrößert. Diese Nachgiebigkeit ist eine charakteristische Eigenschaft jedes Mikrophons und kann nicht ohne weiteres mit einer unabhängigen Methode bestimmt werden. Tatsächlich ist sie jedoch proportional zur Empfindlichkeit und hat (bis auf einen Faktor $i\omega$) den gleichen Frequenzgang wie diese. Am METAS wird das (frequenzabhängige) äquivalente Volumen der Mikrophone in einem iterativen Verfahren ermittelt und durch elektrische Transfer-Impedanz-Messungen in vier Kupplern unterschiedlicher Länge validiert.



3: Um den störenden Einfluss von Umgebungsgeräuschen gering zu halten, muss die Messung an einem ruhigen Ort durchgeführt werden. Der halb-reflektierende Raum des METAS eignet sich aufgrund seines tiefen Grundgeräuschpegels optimal auch für diese Anwendung.



4: Ergebnisse des METAS im internationalen Messvergleich EURAMET.AUV.A-K5. In der linken Darstellung der Messwerte sind die Unsicherheitsbalken kaum auszumachen – sie entsprechen weitgehend der Kurvendicke. In der rechten Graphik ist ersichtlich, dass die Abweichung unserer Messergebnisse vom Referenzwert deutlich kleiner ist, als die assoziierte Messunsicherheit.

Durch die Verwendung der längeren Kuppler kompliziert sich jedoch zusätzlich die Berechnung der akustischen Transfer-Impedanz, weil diese nun nicht mehr einfach über das Volumen beschrieben werden kann. Weitere Komplikationen betreffen die präzise Beschreibung des Kuppler-Milieus (Dichte, Schallgeschwindigkeit, Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten, Viskosität, thermische Diffusivität der Luft) sowie die Tatsache, dass die Kuppler-Wände sich tendenziell isotherm verhalten (während die Wellenausbreitung im Gas ansonsten adiabatisch beschrieben wird). Schliesslich muss auch berücksichtigt werden, dass sich die Mikrophon-Membran nicht wie ein Kolben bewegt, sondern sich zum Zentrum hin maximal ausbeult. Dadurch werden neben der gewünschten longitudinalen Schallausbreitung im Kuppler auch Radialwellen angeregt, deren Einfluss ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Diese komplizierten Berechnungen (unser Matlab-Code umfasst 2000 Programmzeilen) verderben zu einem gewissen Grad die Eleganz dieser Methode der absoluten Bestimmung der Mikrophon-Empfindlichkeit. Insbesondere aber verunmöglichen sie in der Praxis eine analytische Bestimmung der Messunsicherheit. Unsere Messwert-Analyse-Software baut für die Abschätzung der Messunsicherheit auf der Metas. UncLib – einem am METAS entwickelten Messunsicherheits-Berechnungstool auf. In dieser library wird die Messunsicherheit rigoros entsprechend dem GUM ermittelt. Dabei werden sowohl die Ableitungen als auch die Korrelationen der unterschiedlichen Grössen schon beim Erstellen der Formeln für die Berechnung automatisch mitberücksichtigt und unabhängig von der Komplexität der verwendeten Algorithmen korrekt fortgepflanzt.

Validierung durch Messvergleiche

Für die Validierung einer an einem nationalen Metrologieinstitut implementierten (resp. weiter entwickelten) Messmethode ist es wichtig, dass diese in direkten internationalen Messvergleichen validiert wird. Zwei solcher Messvergleiche führten wir in den letzten Jahren mit Laboren nationaler Metrologieinstitute aus Ägypten, Brasilien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, England, Frankreich, Italien, Kenya, Österreich, Polen, Schweden, Serbien, Spanien, Südafrika und der Türkei durch. Der eine (AFRIMETS.AUV.A-S1) [1] basierte auf der Kalibrierung von zwei LS2aP Halb Zoll-Labor-Standard-Mikrophonen in einem Frequenz-Bereich von 1 Hz bis 31.5 kHz. Der zweite Messvergleich (EURAMET.AUV.A-K5) [2] wurde mit LS1P Ein-zoll-Labor-Standard-Mikrophonen in einem Frequenzbereich von 2 Hz bis 10 kHz durchgeführt. Dabei konnte im Wesentlichen demonstriert werden, dass wir mit unserem Mess- und Analyse-Verfahren mit internationalen Referenzen konsistente Kalibrier-Ergebnisse realisieren.

Referenzen

- [1] Metrologia, 2016, 53, Tech. Suppl., 09001
- [2] EURAMET.AUV.A-K5, Comparison of laboratory standard microphone calibrations, http://kcdb.bipm.org/appendixB/KCDB_ApB_info.asp?cmp_idy=1345&cmp_cod=EURAMET.AUV.A-K5&prov=exalead



Kontakt:
 Dr. Christian Hof
 Laborleiter Akustik und Vibration
christian.hof@metas.ch
 +41 58 387 07 50